

УДК: 539.375;539.4

## ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС СКЛАДЕНОЇ БІМЕТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ З УРАХУВАННЯМ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ЗА ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТРИВАЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. Є. АНДРЕЙКІВ<sup>1</sup>, І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>2,3</sup>, А. В. БАБІЙ<sup>4</sup>, М. О. ЛЮБЧАК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Бидгоцька політехніка, Бидгощ, Польща;

<sup>4</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Побудовано розрахункову модель для дослідження впливу експлуатаційної деградації матеріалу на залишковий ресурс складеної біметалевої пластини за дії високої температури і довготривалого статичного навантаження. В її основі – диференціальне рівняння, яке описує ріст тріщини високотемпературної повзучості і містить параметри деградації матеріалу. Оцінено залишковий ресурс пластини зі сталі 12Х1МФ і сплаву ІN-100.

**Ключові слова:** математична модель, ріст тріщини, деградація матеріалу, складена пластина, залишковий ресурс.

A computational model is developed to study the effect of operational material degradation on the residual life of a composite bimetallic plate under high temperature and long-term static loading. The model is based on a differential equation which describes the growth of a high-temperature creep crack and contains the parameters of material degradation. The residual life of the composite plate is estimated in the case when it consists of 12Kh1MF steel and IN-100 alloy.

**Keywords:** mathematical model, crack growth, material degradation, composite plate, residual life.

**Вступ.** Довготривале експлуатування конструкційних матеріалів за дії силових і фізико-хімічних чинників передують їх деградації [1], яка проявляється зміною вихідної мікроструктури [2–4] та фізико-механічних характеристик [5]. Її інтенсифікують високі температури [6, 7] та корозивно-наводнювальні середовища [8, 9], особливо воденьвмісні, коли водень дифундує у поверхню матеріалу, обезвуглечуючи його [10]. Після високотемпературної експлуатації впродовж  $58 \cdot 10^3$  h за тиску пари 25,65 МПа [11] в структурі трубної сталі Р91 з'явилася фаза Лавеса, яка згубно вплинула на її механічні властивості [11]. Також після металографічних досліджень тривало експлуатованих сталей 12Х1МФ і 15Х1М1Ф виявили [12], що їх основні структурні зміни пов'язані з перерозподілом карбідних складників. Причому незалежно від структури у вихідному стані (феритно-перлітна у сталі 12Х1МФ чи бейнітно-феритна у сталі 15Х1М1Ф) спільною особливістю їх деградації є переміщення карбідів на межі зерен, внаслідок чого після експлуатації в структурі переважають зерна фериту з карбідами на їх межах [12]. Зі збільшенням кількості і відсоткового вмісту карбідів здатність сталі Т91 протистояти корозійним впливам послабилась [2]. Внаслідок деградації матеріалів змінюються їх механічні властивості, зокрема, характеристики повзучості [13, 14], міцності та пластичності [15], статичної і циклічної тріщиностійкості [15–17], особливо –

Контактна особа: І. Я. ДОЛІНСЬКА, e-mail: ira\_dolinska@ukr.net

ударна в'язкість [18]. Встановили [19], що ударна в'язкість сталі 09Mn2Si після 37 років експлуатації за температури випробувань 20°C знизилася в 1,48 раза, а при -70°C – у 2,42 раза.

У праці [5] вивчали сталь 20X13 у вихідному стані та після  $\sim 3 \cdot 10^5$  h експлуатації в циліндрі низького тиску парової турбіни К-100-90. Виявили, що внаслідок експлуатації вона зміцнюється і втрачає пластичність, суттєво знижуються її корозійні характеристики, показники втоми і циклічної тріщиностійкості. Зафіксували незначне падіння номінального  $\Delta K_{th}$  (приблизно на 10%) та відчутніше ефективного  $\Delta K_{th\text{ eff}}$  (на понад 30%) порогів циклічної тріщиностійкості [5]. Через деградацію [20], спричинену експлуатацією в лопатках парової турбіни впродовж  $3 \cdot 10^5$  h, статична тріщиностійкість сталі за показником  $J_i$ , який характеризує енергозатрати на старт статичного підростання тріщини, знижується на 17%. Змінилися також її електрохімічні властивості: потенціал  $E$  суттєво змістився у бік від'ємних значень (від -160 до -300 mV) і практично на порядок підвищилася густина струму  $j_c$  (від  $1,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,15 \cdot 10^{-3}$  mA/cm<sup>2</sup>) [5]. У праці [21] запропонували електрохімічний метод для кількісної оцінки ступеня деградації експлуатованих сталей трубопроводів та прогнозування тривкості до крихких руйнувань.

Встановили [22], що внаслідок деградації структури сталей 12X1MФ (період експлуатації  $175 \cdot 10^3$  h) і 15X1M1Ф ( $237 \cdot 10^3$  h) послаблюється опір зародженню та субкритичному росту тріщини, особливо біля зовнішньої поверхні зони розтягу гинів паропроводів.

З допомогою картографічного моделювання [23] визначили зв'язок між пошкодженням внаслідок високотемпературного низькоциклічного навантаження у мікромасштабі та погіршенням механічних властивостей у макромасштабі. Уточнено механізм їх деградації [23]. Дослідження [24] зразків сталі 1,25% Cr–0,5% Mo, вирізаних з промислового обладнання після  $250 \cdot 10^3$  h роботи при 540°C, виявили значну втрату в'язкості матеріалу.

Через деградацію матеріалів елементів конструкцій довготривалої експлуатації знижуються їх фізико-механічні характеристики, а отже, міцність і довговічність. Водночас внаслідок складних експлуатаційних умов в елементах конструкцій зароджуються й поширюються тріщини, які призводять до непередбачуваних руйнувань. Сьогодні розвинуті методи прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій за їх локального руйнування (методи визначення періоду докритичного росту тріщин), і недостатньо тих, які б враховували об'ємне пошкодження – деградацію матеріалів, особливо для неоднорідних елементів, складених із різних матеріалів. Тому за створеною раніше [25–30] теорією аналітичного опису локальної деградації матеріалів і, відповідно, кінетики руйнування нижче побудовано метод для прогнозування залишкового ресурсу складеної біметалевої пластини з урахуванням дії силових і фізико-хімічних чинників. В його основі – термодинамічні рівняння, що моделюють кінетику поширення тріщини високотемпературної повзучості в пластині. Тут враховано одночасну дію деградації матеріалів пластини (зміну фізико-механічних характеристик) та ріст тріщини за довготривалого експлуатування. В основі побудови рівнянь – перший закон термодинаміки і підходи механіки руйнування.

**Формулювання розрахункової моделі.** Розглянемо біметалеву пластину з прямолінійною тріщиною початкової довжини  $2l_0$ , яка розтягується довготривалими статичними зовнішніми зусиллями інтенсивності  $p$  в умовах високої температури  $T$  (рис. 1). Вважаємо, що пластинка складається з двох півплощин  $l$  і  $2$  з близькими модулями пружності і різними механічними характеристиками. Зусилля прикладені перпендикулярно до лінії розташування тріщини, що зумовлює симетричний напружено-деформований стан відносно її розміщення. Під час экс-

плататції матеріал пластини деградуватиме за одночасного поширення тріщини високотемпературної повзучості. Необхідно визначити період її докритичного росту, з досягненням якого пластини втратить свої функціональні властивості.

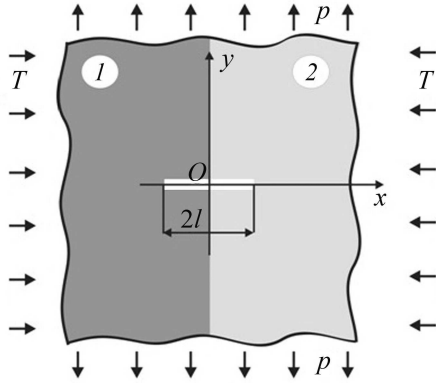


Рис. 1. Схема навантаження складеної біметалевої пластини.

Fig. 1. Loading mode of a composite bimetallic plate.

Задачу розв'язуємо на основі енергетичного підходу [25–30]. Для визначення кінетики поширення  $l_1(t)$ ,  $l_2(t)$  кінців тріщини отримали систему диференціальних рівнянь [25]

$$dl_i / dt = A_i(t_1) \left[ K_{iI}(l_i) K_{iIC}^{-1}(t_1) \right]^{2m_i(t_1)} \left[ 1 - K_{iIC}^{-2}(t_1) K_{iI}^2(l_i) \right]^{-1}, \quad i = 1; 2, \quad (1)$$

де  $A_i$ ,  $m_i$  – характеристики високотемпературної повзучості матеріалів пластини;  $K_{iIC}$  – параметр тріщиностійкості матеріалів;  $K_{iI}(l_i)$  – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) у  $i$ -й вершині тріщини,  $t_1$  – час деградації матеріалів.

Щоб визначити період докритичного росту тріщини, до рівняння (1) додамо такі початкові і кінцеві умови:

$$t = 0, \quad l_i = l_0; \quad t = t_*, \quad l_i = l_{i*}. \quad (2)$$

Критичну довжину тріщини  $l_* = l_{1*} + l_{2*}$  розраховуємо за силовим критерієм механіки руйнування [31]:

$$K_{iI}(l_*) = \min K_{iIC}. \quad (3)$$

Вважаємо пружні характеристики матеріалів півплощин 1 і 2 близькими і із невеликою похибкою – однаковими. Тоді КІН у вершинах тріщини приймаємо рівними ( $K_{1I} = K_{2I}$ ):

$$K_{iI} \approx p \sqrt{0,5\pi(l_1 + l_2)} \quad (i = 1; 2). \quad (4)$$

Систему диференціальних рівнянь (1) розв'язуємо, додаючи перше рівняння до другого:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_1(t_1) \left[ p \sqrt{0,5\pi l} K_{1IC}^{-1}(t_1) \right]^{2m_1(t_1)}}{\left[ 1 - 0,5\pi p^2 K_{1IC}^{-2}(t_1) \right]} + \frac{A_2(t_1) \left[ p \sqrt{0,5\pi l} K_{2IC}^{-1}(t_1) \right]^{2m_2(t_1)}}{\left[ 1 - 0,5\pi p^2 K_{2IC}^{-2}(t_1) \right]}. \quad (5)$$

До рівняння (5) додамо відповідні початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l) = \min K_{iIC} \quad (i = 1; 2). \quad (6)$$

Вважаємо, що пластини складається з двох нескінченних півплощин: перша – з високолегованого сплаву IN-100, друга – зі сталі 12X1МФ. Вибір матеріалів

пов'язаний з тим, що в літературі для них відомі кінетичні діаграми росту тріщин високотемпературної повзучості. Щоб розв'язати задачу (5), (6) з урахуванням деградації матеріалів, необхідно дослідити зміну з часом  $t_1$  характеристик  $A_i$ ,  $m_i$  та тріщиностійкості  $K_{IIIC}$  і побудувати відповідні математичні моделі. Сплав незначно деградуватиме в часі порівняно зі сталлю, тому цю деградацію нехтуватимемо в розрахунках залишкового ресурсу пластини і враховуватимемо тільки вихідні характеристики [32]:  $T = 732^\circ\text{C}$ ,  $K_{IIIC} = 142 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ,  $A_1 = 0,05 \text{ мм/г}$ ,  $m_1 = 4$ . Для сталі описуємо їх лінійними залежностями від часу  $t_1$  [33]. Тріщиностійкість сталі (зразки вирізали з труби паропроводу) досліджували у вихідному стані і після експлуатації  $120\cdot 10^3 \text{ h}$  за температури  $732^\circ\text{C}$  [33]. В результаті випробувань побудували кінетичні залежності швидкості росту тріщини від КІН (рис. 2). За експериментальними даними і рівнянням (1), використовуючи метод найменших квадратів, для вихідного матеріалу знайшли:  $A_2 = 8,9\cdot 10^{-4} \text{ м/г}$ ,  $m_2 = 4,1$ ,  $K_{2IC} = 101 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ; для деградованого:  $A_2 = 1,01\cdot 10^{-3} \text{ м/г}$ ,  $m = 3,7$ ,  $K_{2IC} = 89 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ .

Звідси зміна цих параметрів в часі (лінійна залежність) буде:

$$A_2(t_1) = 8,9\cdot 10^{-4} + 10^{-9}t_1, \quad m_2(t_1) = 4,1 - 3,33\cdot 10^{-6}t_1, \quad K_{2IC}(t_1) = 101 - 10^{-4}t_1. \quad (7)$$

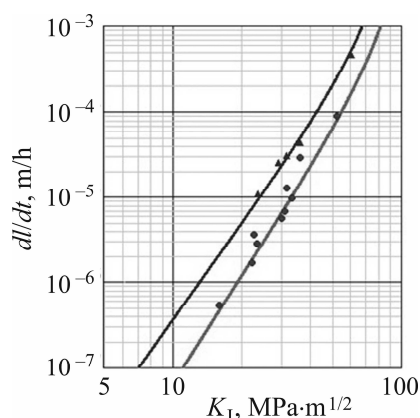


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Діаграма росту тріщини повзучості в сталі 12Х1МФ [33]:  
● – труба у вихідному стані; ▲ – після напрацювання  $120\cdot 10^3 \text{ h}$ .

Fig. 2. Diagram of creep crack growth in 12Kh1MF steel [33]:  
● – pipe in the initial state; ▲ – pipe after  $120\cdot 10^3 \text{ h}$  working.

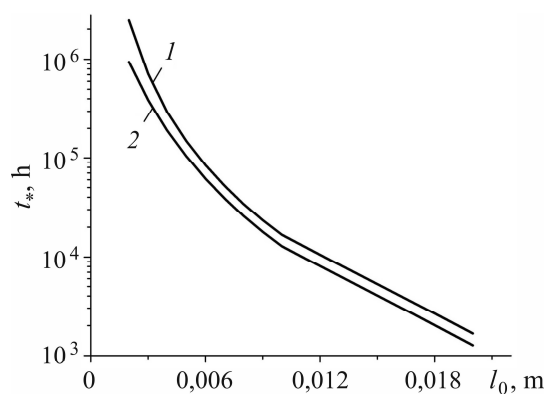


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залишковий ресурс складеної пластини: 1 – недеградований матеріал;  
2 – експлуатаційно деградований.

Fig. 3. Residual lifetime of the folded plate: 1 – non-degraded material;  
2 – operationally degraded.

Математичну задачу (5), (6) з урахуванням співвідношень (7) розв'язали числово. Розв'язок подали у вигляді графічної залежності залишкового ресурсу пластини від початкового розміру тріщини (рис. 3, крива 2). Виявили, що деградація матеріалу призводить до зменшення залишкового ресурсу пластини, особливо за малих розмірів тріщини.

## ВИСНОВКИ

За енергетичним підходом сформульовано розрахункову модель для оцінювання впливу деградації матеріалу на залишковий ресурс складеної біметалевої пластини зі сплаву IN-100 і сталі 12Х1МФ. За експериментальними результатами побудовано математичні моделі деградації. Виявлено її негативний вплив на залишковий ресурс пластини.

1. *Michael Pfeifer*. Chapter 6 – Degradation and Reliability of Materials // *Materials Enabled Designs*. – Butterworth-Heinemann, 2009. – P. 161–187.
2. *Mechanical properties and phases evolution in T91 steel during long-term high-temperature exposure / Yuyang Lia, Jinfeng Du, Linping Li, Kewei Gao, Xiaolu Pang, and Alex A. Volinsky // Eng. Failure Analysis*. – 2020. – **111**. – P. 1–9. – Article number 104451.
3. *Gwoździk M., Motylenko M., and Rafaja D*. Microstructure changes responsible for the degradation of the 10CrMo9-10 and 13CrMo4-5 steels during long-term operation // *Mater. Res.* – 2020. – № 7. – Article number 016515.
4. *Damir Hodžić and Ismar Hajro*. Microstructure degradation after prolonged exploitation of heat resistant steel 14MoV6-3 // 16<sup>th</sup> Int. Research/Expert Conf. “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT 2012, Dubai, UAE, 10–12 September 2012. – P. 155–158.
5. *Ткачук Ю., Студент О.* Оцінювання деградації лопаткової сталі 20Х13 після експлуатації в паровій турбіні за тріщиностійкістю // *Машинознавство*. – 2011. – № 1–2. – С. 37–43. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/maz\\_2011\\_1-2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/maz_2011_1-2_11)
6. *Heloisa Cunha Furtado and Iain Le May*. High temperature degradation in power plants and refineries // *Mater. Res.* – 2004. – **7**, № 1. – P. 103–110.
7. *Degradation of 0.5Cr–0.5Mo–0.25V steel microstructure during exploitation / Anna Výrostková, Ján Kepič, Roman Macko, and Viera Homolová // Mater. Eng. – Materiálové inžinierstvo*. – 2011. – **18**. – P. 73–78.
8. *Corrosion induced degradation of fatigue strength of steel in service for 128 years / Le Li, Chun-Qing Li, Mojtaba Mahmoodian, Wenhai Shi // Structures*. – 2020. – **23**. – P.415–424.
9. *Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel / H. Nykyforchyn, O. Tsyrunyk, O. Zvirko, and M. Hredil // Proc. Struct. Integrity*. – 2020. – **28**. – P. 896–902.
10. *Мелехов Р. К., Похмурський В. І.* Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості, деградація. – К.: Наук. думка, 2003. – 374 с.
11. *Laves phase formation and its effect on mechanical properties in P91 steel / Z. X. Xia, Chuan-Yang Wang, Yan-Fen Zhao, Guo-Dong Zhang, Lu Zhang, Xin-Ming Meng // Acta Metall. Sin.* – 2015. – **28**, № 10. – P. 1238–1246.
12. *Нукифорчин Г. М., Кречковська Г. В., Студент О. З.* Структурні зміни в теплостійких сталях, спричинені зупинками блоків ТЕС // *Наук. нотатки*. – 2011. – № 31. – С. 221–228.
13. *Ray A. K.* Long-term creep-rupture behavior of 813 K exposed 2.25Cr–1Mo steel between 773 and 873 K // *Mat. Sci. and Eng. A*. – 2007. – **454–455**. – P. 124–131.
14. *The specific of the creep process in hydrogen of the degraded in service 2.25Cr–Mo steel / A. Zagórski, O. Student, L. Babiy, H. Nykyforchyn, and K. Kurzydowski // 17<sup>th</sup> European Conf. on Fracture 2008: Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures (Brno, Czech Republic, 2008)*. – P. 2307–2314.
15. *Свірська Л. М., Кречковська Г. В., Студент О. З.* Циклічна тріщиностійкість сталі 12Х1МФ різних зон гину парогону ТЕС після тривалої експлуатації // *Вісник ТНТУ*. – 2015. – № 4. – С. 27–34. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/tstub\\_2015\\_4\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/tstub_2015_4_5)
16. *Cyclic crack resistance and micromechanisms of fracture of steel 25Kh1M1F / P. O. Maruschak, D. Baran, A. Sorochak, R. Bishchak, and V. Yasnii // Strength of Mater.* – 2012. – **44**, № 4. – P. 410–418.
17. *Dmytrakh I., Leshchak R., and Syrotyuk A.* Effect of environmental composition on fatigue crack growth and hydrogen permeation in carbon pipeline steel // *Lecture Notes in Civil Eng.* – 2021. – **102**. – P. 145–159.
18. *Mechanical behaviour of material of thermal power plant steam superheater collector after exploitation / O. Yasniy, T. Vuherer, V. Yasniy, A. Sobchak, and A. Sorochak // Eng. Failure Analysis*. – 2013. – **27**. – P. 262–271.

19. *Effect of operating degradation in arctic conditions on physical and mechanical properties of 09Mn2Si pipeline steel* / S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, A. S. Syromyatnikova, A. M. Bolshakov, F. Berto, O. Prentkovskis, and B. B. Ovechkin // *Proc. Eng.* – 2017. – **178**. – P. 597–603.
20. *Статична тріщиностійкість лопаток парових турбін* / Ю. Ткачук, П. Рожакхеды, Р. Белезнай, О. Студент // *Вісник ТНТУ.* – 2011. – Спец. вип.; ч. 1. – С. 106–114.
21. *Zvirko O., Tsyurulnyk O., and Nykyforchyn H. Non-destructive evaluation of operated pipeline steel state taking into account degradation stage* // *Proc. Struct. Integrity.* – 2020. – **26**. – P. 219–224.
22. *Ostash O. P., Vol'demarov O. V., and Hladysh P. V. Cyclic crack resistance of the steels of bends of steam pipelines after long-term operation* // *Materials Science.* – 2013. – **48**, № 4. – P. 427–437.
23. *Determination of relationship between high-temperature low cycle fatigue damage and mechanical property degradation: Experimental and theoretical analyses* / Li Sun, Run-Zi Wang, Kai-Shang Li, Xian-Cheng Zhang, and Shan-Tung Tu // *Int. J. of Fatigue.* – 2023. – **175**. – Article number 107771. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107771>
24. *Comparison between real and simulated degradation in a 1.25% Cr–0.5% Mo steel for high temperature service* / Ivaní de Souza Bott, Luís Felipe Guimarães de Souza, Jorge Carlos Ferreira Jorge, José Cláudio Guimarães Teixeira, and Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos // *Materials Characterization.* – 2005. – **54**, № 3. – P. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.10.009>
25. *Andreikiv O. Ye. and Dolinska I. Ya. Determination of the period of subcritical growth of small plane high-temperature creep cracks in structural elements* // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 2. – P. 154–162. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00526-1>
26. *Evaluation of the residual service life of main pipelines with regard for the action of media and degradation of materials* / O. Ye. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, I. P. Shtoiko, O. K. Raiter, and Yu. Ya. Matviiv // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 5. – P. 638–646. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00228-9>
27. *Andreikiv O. E., Dolins'ka I. Ya., and Yavors'ka N. V. Growth of creep cracks in structural elements under long-term loading* // *Materials Science.* – 2012. – **48**, № 3. – P. 266–273. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9502-1>
28. *Development of a method for determining the residual life of structural elements with cracks under the action of load and corrosive environment, as well as the application of corrosion inhibitors to enhance it* / O. Andreykiv, I. Dolinska, S. Nastasiak, and N. Zviahin // *Corrosion.* – 2024. – **80**, № 5. – P. 530–538. <https://doi.org/10.5006/4433>
29. *The influence of operational degradation of material on the residual life of oil pipelines* / O. Ye. Andreikiv, I. Ya. Dolinska, M. O. Liubchak, and S. V. Nastasiak // *Materials Science.* – 2023. – **59**, № 4. – P. 385–394. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00789-4>
30. *Andreykiv O. Ye. and Dolinska I. Ya. Mathematical modeling of growth of stress-corrosion cracks in an oil pipeline with regard for hydroshocks and in-service changes in the characteristics of its material* // *J. of Math. Sci. (United States).* – 2024. – **278**, № 5. – P. 908–917. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-06968-7>
31. *Anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.* – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 688 p.
32. *Fuji A. and Kitagawa M. A. Comparison of creep crack growth behaviour in nickel based super alloy with low alloy steel* // *Advances in fracture resistance and structural integrity: Selected papers from the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Fracture (ICF 8), Kyiv, Ukraine, 8–14 June 1993.* – Pergamon, 1994. – P. 487–495.
33. *Махутов Н. А., Гринь Е. А., Саркисян В. А. Кинетика развития трещин в энергомашиностроительных сталях при высокотемпературной ползучести* // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2015. – **81**, №11. – С. 44–52.

Одержано 16.07.2024